



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.9: 621.91.01: 621.9.025

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-421-434>

Оценка напряженного состояния режущих элементов концевых твердосплавных составных фрез с покрытиями

© Б.Я. Мокрицкий*, В.Ю. Верещагин**

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

**Новосибирский государственный педагогический университет, г. Новосибирск, Россия

Резюме: Цель работы – исследовать величины напряжений в инструментальном материале составных концевых фрез для того, чтобы сравнить их с допустимыми напряжениями с позиций исключения разрушения фрез. Объектом исследования являются предельные величины напряжения в инструментальном материале разработанных составных концевых твердосплавных фрез, имеющих сопряженные между собой режущую часть и хвостовик. Режущая часть выполнена из инструментального твердого сплава, хвостовик – из конструкционной стали. Для определения напряжений использовано имитационное моделирование в программной среде ANSYS и Deform. Составляющие силы резания определены экспериментально. Принято, что чем меньше величины составляющих силы резания, тем меньше величины напряжений в инструментальном материале, и тем меньше возможность разрушения инструментального материала. Рассмотрено фрезерование труднообрабатываемой нержавеющей стали 12X18H10T со скоростью резания 70 м/мин, с глубиной резания 1 мм и подачей 0,1 мм/зуб. Рассмотрен инструментальный материал VK8 без покрытий и с разными покрытиями, которые способствуют снижению составляющих сил резания. Доказано, что составной концевой фрезой диаметром 16 мм и длиной 92 мм можно обрабатывать детали с той же точностью, с какой их обрабатывают монолитной (цельной) концевой твердосплавной фрезой. С увеличением длины составных фрез точность обработки снижается, но при длинах 123 мм и 180 мм они применимы для изготовления деталей, используемых в общем машиностроении. Таким образом, составные концевые фрезы могут конкурировать с монолитными фрезами по точности изготовления и периоду стойкости, чем ограничивают существующую область применения монолитных фрез. При этом стоимость составных фрез меньше монолитных на 10–60%.

Ключевые слова: составные концевые фрезы, напряжения в инструментальном материале, минимизация отката фрезы, зуб фрезы, имитационное моделирование, ANSYS

Для цитирования: Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю. Оценка напряженного состояния режущих элементов концевых твердосплавных составных фрез с покрытиями. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 421–434. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-421-434>

Evaluation of the stressed state of cutting elements of coated end-milling hard-alloy combined cutters

Boris Ya. Mokritskii*, Vladislav Yu. Vereshchagin**

*Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure, Russia

**Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: This paper compares stresses arising in the tool material of combined end-milling cutters and their admissible values with the purpose of preventing cutter destruction. The limit stress values of tool materials for the developed end-milling hard-alloy combined cutters having an interfaced cutting part and tailpiece were investigated. The cutting part was made of a tool-grade hard alloy, and the tailpiece was made of structural steel. To determine stresses, simulation modeling was carried out in the ANSYS and Deform software. The cutting force components were found experimentally. It was assumed that lower cutting force components lead to lower stresses in the tool material. This results in a lower probability of tool material destruction. The process of cutting the hard-to-cut stainless steel 12Kh18N10T was considered at the following parameters: a cutting speed of 70 m/min, a cutting depth of 1 mm, and a feeding of 0.1 mm/tooth. The tool material VK8 with no coating and with various coatings promoting the reduction of cutting force components was studied. It was confirmed that a combined end-milling cutter 16 mm in diameter and 92 mm long can be used to cut parts with the same accuracy as using a solid end-milling hard-alloy cutter. An increase in the length of combined cutters decreases the cutting accuracy; however, for lengths 123 and 180 mm, these cutters can be used to manufacture parts applied in general machine building. Therefore, combined end-milling cutters can compete with solid cutters in terms of the manufactur-

ing accuracy and resilience period, which limits the existing applicability of solid cutters. The cost of combined cutters is 10–60% lower than that of solid cutters.

Keywords: composite end mills, tool material stresses, milling cutter failure minimization, milling cutter tooth, simulation, ANSYS

For citation: Mokritskii B.Ya., Vereshchagin V.Yu. Evaluation of the stressed state of cutting elements of coated end-milling hard-alloy combined cutters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):421–434. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-421-434>

ВВЕДЕНИЕ

Основной причиной скола хвостовика монолитных концевых твердосплавных фрез у места крепления их в патроне станка является [1, 2] превышение напряжений в материале твердого сплава тех величин напряжений, которые для данной марки твердого сплава являются предельно допустимыми. Отказ такой фрезы не позволяет использовать ее далее. В качестве частичной альтернативы монолитным фрезам разработаны [3–5] составные фрезы. У них режущая часть выпол-

нена из твердого сплава и состыкована с хвостовиком, выполненным из конструкционного материала. Общее представление о составных фрезах дают их фотографии, приведенные на рис. 1.

Будучи подверженным таким же воздействиям при фрезеровании, как и монолитные твердосплавные концевые фрезы, составные фрезы обеспечивают релаксацию напряжений в материале хвостовика фрезы, что исключает разрушение хвостовика.



a



b



c

Рис. 1. Примеры составных концевых фрез: a, b – примеры фрез с покрытием, кольцевая канавка указывает место стыкования режущей части с хвостовиком; c – пример работы фрезой на станке с числовым программным управлением

Fig. 1. Examples of composite end mills: a, b – examples of coated end mills, the annular groove indicates the joint of the cutting part and the shank; c – an example of milling cutter operation on a numerically controlled machine tool



Примеры обработки составной фрезой вертикальной стенки заготовки (инструментальная сталь) с высокой твердостью (HRC 65) и обработки верхней поверхности заготовки, выполненной из алюминиевого сплава, показаны на рис. 2.

На рис. 2 а показан случай, когда фреза эксплуатируется в чрезвычайно сложных условиях (ширина фрезерования равна длине 40 мм режущей части фрезы), на рис. 2 б, наоборот, показан случай щадящих условий эксплуатации (ширина фрезерования составляет 5 мм). В том и другом случае

подача на зуб равна 0,1 мм. Для рис. 2 а применено попутное фрезерование, на фото хорошо видны длинная стружка игольчатой формы и обработанная поверхность зеркального блеска на заготовке. Такой жесткий режим эксплуатации фрезы применен умышленно для провоцирования разрушения фрезы. Разрушения не произошло. После 40 мин работы в таких условиях режущие лезвия зубьев фрезы имели нормальный характер износа с незначительными местными выкрашиваниями.



а



б

Рис. 2. Примеры фрезерования составными фрезами различных заготовок:
а – обработанная вертикальная поверхность заготовки и игольчатая стружка, образовавшаяся при фрезеровании и упавшая на зажимное приспособление; **б –** планирование горизонтальной поверхности заготовки, выполненной из алюминиевого сплава

Fig. 2. Examples of milling various workpieces with composite cutters:
a – machined vertical surface of the workpiece and needle-shaped chip formed under milling and dropped on the clamping device;
b – planing of the horizontal surface of the aluminum alloy workpiece

На рис. 2 б применялись поочередно попутное и встречное фрезерования (контурная обработка). Стружка имела элементную форму. Провоцировали залипание обрабатываемого материала в стружечных канавках фрезы, но этого не произошло, возможно, из-за того, что на станке применялась обильная подача смазывающе-охлаждающей жидкости в зону резания.

Вопросы сопоставления точности изготовления пазов в заготовках деталей при использовании монолитных и составных фрез рассмотрены в работах¹ [1, 2, 6]. Установлено, что есть условия, в которых составные фрезы не уступают (при диаметре фрезы 16 мм, длине 92 мм, режущей части, выполненной из твердого сплава ВК8 с хвостовиком, сделанным из конструкционной стали 40Х, либо из инструментальной стали марки Р18, либо из неинструментального твердого сплава марки Т30К4) монолитным фрезам или уступают (при длине фрезы от 92 мм до 180 мм) им незначительно (от 2 мкм до 5 мкм, что применимо для изделий общего машиностроения).

Изложенное выше указывает на необходимость исследования напряжений в режущей части составных фрез, по меньшей мере, для того чтобы выявить наиболее рациональные пути снижения напряжений, что еще более повысит конкурентоспособность составных фрез по отношению к монолитным фрезам. Одним из путей может быть применение покрытий на твердосплавном субстрате фрез. Это позволяет сформулировать следующую цель данной работы: исследовать величины напряжений в инструменталь-

ном материале составных концевых фрез для того, чтобы сравнить их с допустимыми напряжениями с позиций исключения разрушения фрез. Вопросы прочности инструментального материала в данной работе не рассматриваются.

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Имитационное моделирование используем как метод исследования для выявления наиболее эффективных покрытий. Моделирование осуществляли в программных средах ANSYS и Deform.

Опыт (Д.А. Криворучко, Украина) проектирования инструмента в программной среде Deform показал перспективность такого проектирования. Там решается задача упрощенно, а именно – предполагаются известными закономерности протекания процессов на контактных поверхностях инструмента. Приближенно они описаны законами Аммонтона–Кулона и Зибеля. Этот подход для нас неприемлем, потому что проектируем новое покрытие, для которого эти закономерности неизвестны.

Поэтому используем другой методологический подход, его суть в следующем: чем меньше сила резания, тем более высокую работоспособность можно ожидать от такого инструмента и, в частности, от примененного на нем покрытия. Зная составляющие силы резания для моделирования разных покрытий, можно определить величины напряжений в инструментальном материале по зависимостям профессора С.И. Петрушина (Томск):

$$\sigma_{\max} = 2 \cdot \frac{P_y \cdot [\cos \gamma \cdot \sin(\gamma + \Theta) - \sin \alpha \cdot \cos(\alpha - \Theta) + \beta \cdot \cos \Theta] + P_z \cdot [\sin \alpha \cdot \sin(\alpha - \Theta) - \dots]}{r \cdot [(\sin^2 \alpha - \cos^2 \gamma) - \beta^2 + \dots \frac{\cos \gamma \cdot \cos(\gamma + \Theta - \beta \cdot \sin \Theta)}{+(\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \gamma \cdot \cos \gamma)^2}]}, \quad (1)$$

¹ Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю., Верещагина А.С., Саблин П.А. Металлорежущий инструмент. Компьютерное моделирование: учеб. пособ. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2017. 76 с.

где P_y и P_z – составляющие силы резания; α – главный задний угол; γ – передний угол; r и Θ – полярные координаты в главной секущей плоскости резания.

Полагали, что от силы резания перейти к величинам напряжений можно по зависимости (С.И. Петрушин) напряжений в инструментальном материале от составляющих силы резания. Под эквивалентными напряжениями в инструментальном материале понимали следующее:

$$\sigma_{\text{эк}} = \sqrt{\sigma_{z \max}^2 + \sigma_{y \max}^2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{z \max}$ – расчетные максимальные напряжения по передней поверхности режущего клина; $\sigma_{y \max}$ – расчетные максимальные напряжения по задней поверхности режущего клина.

Для определения составляющих сил резания провели экспериментальные исследования с использованием специализированного динамометра модели STD 201-2, сопрягаемого с ПЭВМ. Это обеспечило измерение и запись всех трех составляющих силы резания. Пример такой записи показан на рис. 3.

Анализ подобных записей составляющих силы резания показал существенное различие в значениях и изменении сил резания даже при незначительном изменении условий резания (обе стали 09Х17Н7Ю и 13Х15НАМ-3 являются труднообрабатываемыми и их физико-механические характеристики отличаются принципиально). Максимальные значения величин составляющих силы резания показаны для отдельных случаев в табл. 1, наблюдается существенное отличие (до 2 раз) величин для некоторых составляющих силы резания.

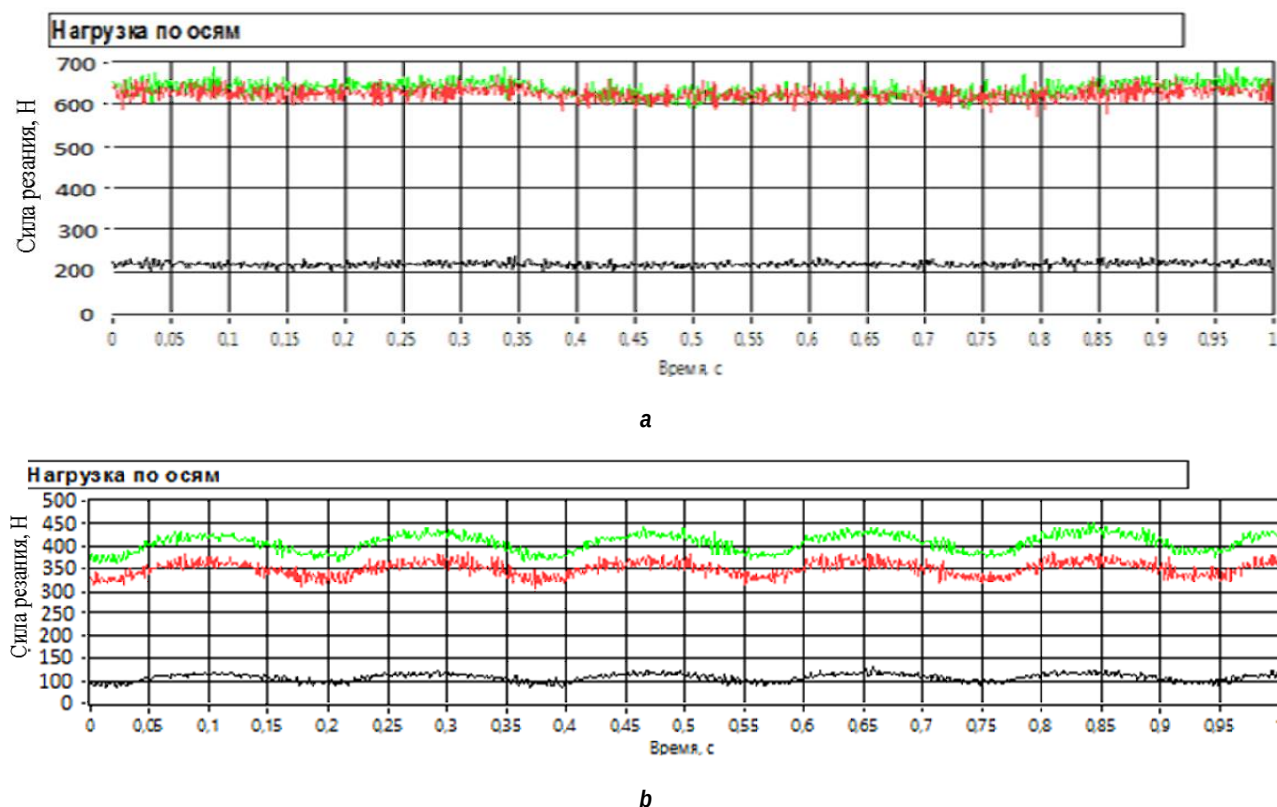


Рис. 3. Примеры записи составляющих сил резания (на графике верхняя линия отображает вертикальную составляющую силы резания, нижняя линия – продольную составляющую, средняя линия – радиальную составляющую): а – обрабатываемый материал 09Х17Н7Ю; б – обрабатываемый материал 13Х15НАМ-3

Fig. 3. Examples of recording cutting force components (the upper line on the graph shows the vertical component of the cutting force, the lower line indicates the longitudinal component, the middle line shows the radial component): а – machined material 09H17N7YU; б – machined material 13H15NAM-3

Таблица 1. Величины составляющих силы резания
Table 1. Values of the cutting force components

Составляющие силы резания	09X17H7Ю	13X15H AM-3
F _x – продольная составляющая силы резания, Н	85,5	35,2
F _y – радиальная составляющая силы резания, Н	305,2	310,1
F _z – вертикальная составляющая силы резания, Н	362,5	191,4

Для использования составляющих силы резания в качестве входного параметра при использовании программной среды Deform разработана структурная модель в двух вариантах:

1) для решения прямой задачи, когда прогнозируемая архитектура покрытия является управляемым выходным параметром программной среды;

2) для решения обратной задачи, когда желаемая архитектура покрытия задается на входе в программную среду, а на выходе получают параметры, характеризующие сложнонапряженное состояние материала режущего инструмента.

Пример структурной модели имитационного проектирования для решения обратной задачи показан на рис. 4. По этой модели для имитационного исследования (поиска) инструментального материала с покрытием в качестве задаваемых условий (левая часть верха рис. 4) оказалось достаточно задать нормируемую (допустимую) величину износа h_1 инструмента, максимальную (см. табл. 1) величину составляющей силы резания F_1 , предельно допустимую температуру $^{\circ}C_1$ в инструментальном материале и предпочтительный пример архитектуры покрытия. Понятие «архитектура покрытия» введено А.С. Верещакой, и в упрощенном виде подразумевает состав, структуру, конструкцию и технологию нанесения покрытия. Например, запись $BK8 + TiC(2 \text{ мкм}) + (TiCr)N(3 \text{ мкм}) + Al_2O_3(2 \text{ мкм})$ следует понимать так: на твердосплавной субстрат марки BK8 нанесено трехслойное покрытие, а именно – нижний (контактирующий с субстратом) слой толщиной 2 мкм карбида титана, следующий слой толщиной 3 мкм выполнен из нитрида титана с хромом, верхний слой толщиной 2 мкм вы-

полнен из алмазоподобного Al_2O_3 покрытия. Нанесение каждого из указанных слоев требует своей технологии. Нами использованы только известные технологии.

В качестве выходных (управляемых) параметров для этого примера решения обратной задачи программная среда выводит сведения:

- прогнозируемая величина износа инструмента при заданном покрытии;

- прогнозируемая величина силы резания (не допускали превышение 3000 Н);

- прогнозируемая температура в инструментальном материале (не допускали превышение теплостойкости и термостойкости субстрата);

- напряжения в инструментальном материале (это и являлось искомым параметром имитационного исследования);

- дополнительные параметры (деформация инструмента и скорость деформации), характеризующие сложнонапряженное состояние инструментального материала.

Математический аппарат, заложенный в средах ANSYS и Deform, авторами не изменен. Для решения дифференциальных уравнений, положенных в основу в этих программных средах, авторы задавали указанные граничные условия и исходные данные.

Для решения задачи необходима расчетная схема для определения напряжений. Расчетная схема реализована для типовой трехзубой фрезы. Для проведения численного моделирования напряжений использован метод конечных элементов. Приняты следующие параметры фрезы: общая длина фрезы $L = 90\text{--}220$ мм; длина режущей части $l = 40$ мм; диаметр фрезы $d = 12\text{--}16$ мм; материал режущей части фрезы – твердый сплав марки BK8; материал хвостовика варьировали (рассмотрены материалы 40X, P18, T30K4).

В качестве посылы для построения расчетной схемы определения напряжений приняли следующее условие: составная фреза создана ради повышения ее эксплуатационных свойств в сравнении с монолитной фрезой, при этом точность изготовления деталей, обрабатываемых составной фрезой, должна обеспечивать ее применение в раз-



личных условиях машиностроительных предприятий. Это условие оговорено расчетной схемой отклонений обработанной поверхности детали от ее теоретического положения, рис. 5 а. Условия применения метода конечных элементов отражены на рис. 5 б и 5 с.

Схему, приведенную на рис. 5 а, принимали как схему образования отклонения **В** от вертикали положения стенки обрабатываемого паза при действии радиальной составляющей **Р1** силы резания: 1 – хвостовик фрезы; 3 – твердосплавная режущая часть фрезы; 3 – зажимное устройство станка; 4 – обработанная поверхность паза заготовки 5.

ИНФОРМАЦИЯ О РОЛИ ПОКРЫТИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СОСТАВНЫХ ФРЕЗ

Профессор С.Н. Григорьев показал, что в зависимости от решаемых задач покрытие может выполнять функции:

– высокотвердого поверхностного слоя, препятствующего абразивному изнашиванию рабочих поверхностей инструмента в процессе резания;

– промежуточной среды, обладающей низким сродством с обрабатываемым материалом и препятствующей интенсивному схватыванию в условиях адгезионного изнашивания;

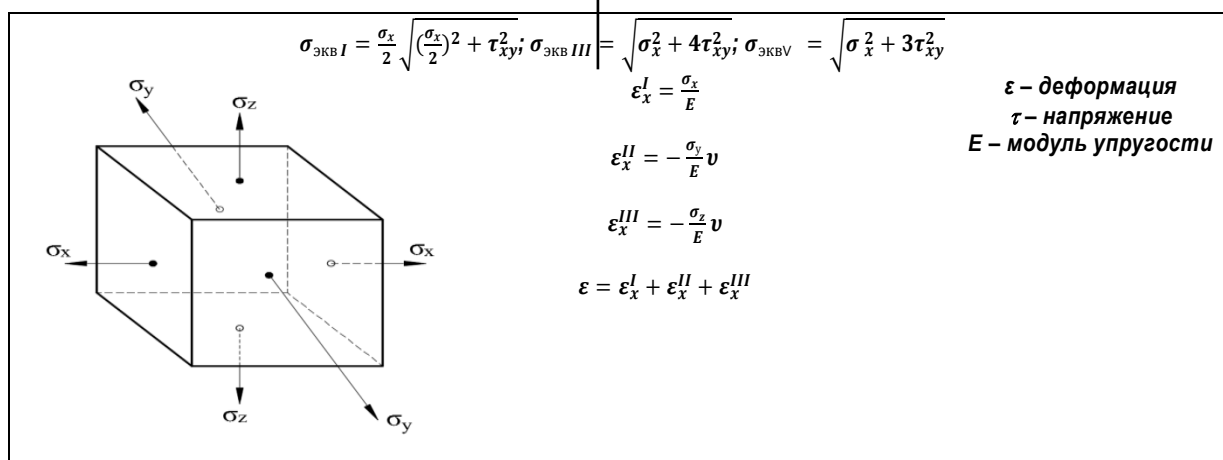
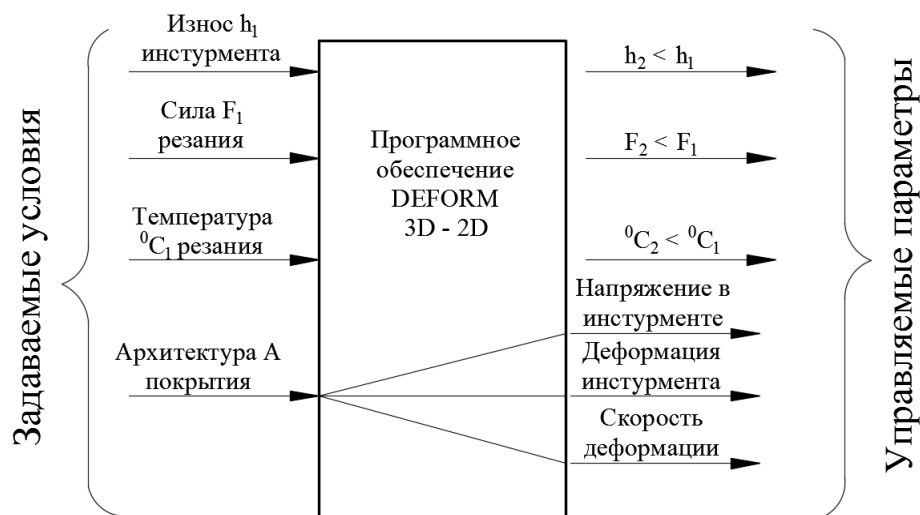


Рис. 4. Структурная модель разработки инструмента в программной среде Deform (используемые обозначения и их размерности общепринятые, а именно: τ_{xy}^2 – касательные напряжения; $\sigma_x, \sigma_z, \sigma_y$ – нормальные напряжения; ϵ – деформация относительная; E – модуль упругости

Fig. 4. Structural model of tool development in the Deform software environment (the symbols used and their dimensions are generally accepted, specifically: τ_{xy}^2 – tangential stresses; $\sigma_x, \sigma_z, \sigma_y$ – normal stresses; ϵ – relative strain; E – modulus of elasticity

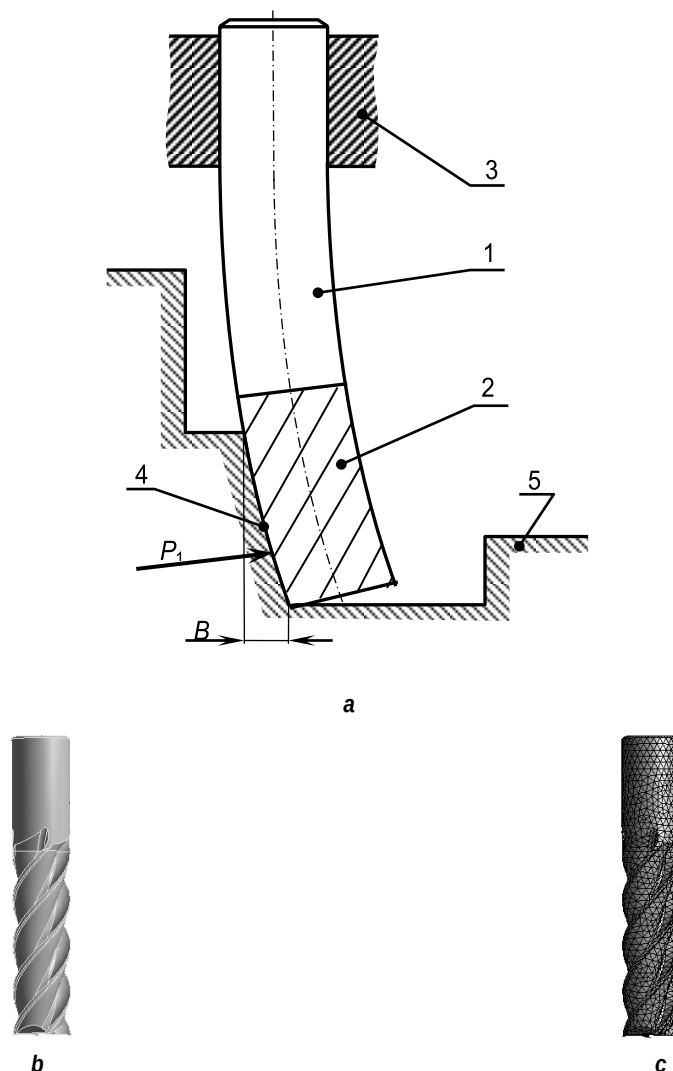


Рис. 5. Расчетная схема для определения напряжений: а – как схема деформации корпуса фрезы;
 б – физический вид модели фрезы; с – пример модели фрезы с разбиением на 100 тыс. конечных элементов
 Fig. 5. Calculation model for stress determination: а – as a diagram of milling cutter body deformation;
 б – physical view of the milling cutter model; с – an example of a milling cutter model segmented
 into 100 000 finite elements

– антифрикционной твердой смазки, минимизирующей налипание обрабатываемого материала на инструмент в процессе резания;

– барьерного слоя, препятствующего отпуску поверхностного слоя инструмента в результате воздействия повышенных тепловых нагрузок;

– барьерного слоя, способного тормозить или останавливать распространение сетки усталостных трещин, приводящей к макровыкрашиванию рабочих кромок.

Общеизвестным фактом повышения физико-механических и эксплуатационных свойств металлорежущего инструмента является создание слоистых материалов – со-

единение высокопрочного субстрата с покрытием [7, 8]. Вместе с тем рабочий поверхностный слой с таким градиентом свойств в материале остается весьма чувствительным к поверхностным дефектам, возникающим при его изготовлении, особенно при шлифовании рабочих поверхностей. Кроме того, сохраняется основная особенность контактных процессов, возникающая при резании таким инструментом, связанная с высоким уровнем нормальных контактных напряжений и концентрацией тепловых напряжений вблизи режущей кромки, что является причиной ее деструкции. Специальные многослойно-композиционные покрытия позволяют «залечить» поверхностные дефекты, вносимые



заточкой, а также снизить уровень нормальных контактных и тепловых напряжений. Применение инструмента с наноструктурированным многослойно-композиционным покрытием позволяет повысить период стойкости в 2–3 раза по сравнению с инструментом без покрытия и в 1,5–2 раза по сравнению с инструментом с коммерческим покрытием Ti-TiN. Концептуальная роль покрытия состоит в двойственной функции, так как оно может не только сильно изменять поверхностные характеристики инструментального материала (фрикционные свойства, теплопроводность, склонность инструментального материала к физико-химическому взаимодействию с обрабатываемым материалом и т.д.), но и одновременно может влиять на контактные процессы. Многофункциональность промежуточной технологической среды, которой является покрытие, позволяет прогнозировать возможность направленного управления температурой резания [8–11].

Покрытия применяются и на монолитных фрезах. Но в рамках данной работы не представляется возможным сравнить напряжения в монолитной фрезе с напряжениями в составной фрезе. Объясняется это тем, что зарубежные производители монолитных фрез засекречивают архитектуру покрытия и сам твердый сплав. В силу этого нет возможности сравнивать взятое нами покрытие и инструментальный твердый сплав ВК8 с неизвестным зарубежным покрытием и субстратом. Отечественные монолитные концевые фрезы доброкачественно выпускает только фирма «СКИФ-М» (г. Белгород) и ее филиал «СКИФ ДВ М» (г. Комсомольск-на-Амуре). Архитектура и технология нанесения покрытия засекречены.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Путем имитационного моделирования рассчитаны (и построены изолинии) напряжения в режущем лезвии зуба фрезы при разных условиях эксплуатации. Один из примеров показан на рис. 6.

Цифры на изолиниях указывают величину (МПа) напряжений вдоль данной изолинии напряжений.

Анализ рис. 6 показывает, насколько сложный характер распределения напряжений прогнозируется. Применение покрытий заметно снижает величины напряжений, но характер их распределения по-прежнему остается сложным. Более удобно для анализа изменений напряжений это показано в табл. 2. Напряжения σ_z на задней поверхности зуба фрезы тоже имеют сложный характер распределения, но он значительно проще, чем на передней.

Величины прогнозируемых напряжений в общем виде показаны в табл. 2. Их можно сравнить с предельно допустимыми напряжениями для сплава ВК8 и оценить условную прочность инструмента с покрытием и без покрытия. Однако необходимо отметить, что это приближенная оценка. Дело в том, что сплав ВК8, как правило, имеет каркасную структуру, состоящую из твердой фазы (зерна карбида вольфрама), мягкой фазы (кобальт) и контактов зерен твердой фазы между собой. Каждый из этих звеньев структуры способен выдерживать нагрузки, свойственные им. В результате внешних и внутренних нагрузок каждое звено структуры подвержено своим максимальным напряжениям (принято называть максимальной интенсивностью напряжений). Так, напряжения в зернах карбида вольфрама недопустимы (при растяжении) выше 9,1 ГПа. Максимальная интенсивность напряжений в кобальте составляет 4,5 ГПа. Из этого следует, что первоначально при предельном нагружении начнет разрушаться кобальт. Основными концентраторами напряжений являются контакты между зернами карбида вольфрама. В них максимальная интенсивность напряжений достигает 9,8 ГПа.

Сопоставление прогнозных величин напряжений с предельно допустимыми показано в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что прогнозируемые величины напряжений на несколько порядков меньше величин предельно допустимых напряжений. Это относится к напряжениям, действующим на передней поверхности и на задней поверхности зубьев фрезы. Превышение также ощутимо в случае применения покрытий.

Таблица 2. Величины напряжений (МПа), действующих на передней поверхности σ_y и на задней поверхности σ_z зуба фрезы (для подачи 0,1 мм/зуб, скорости резания 70 м/мин при попутном фрезеровании стали 12Х18Н10Т)
Table 2. Values of stresses (MPa) acting on the front surface σ_y and on the back surface σ_z of the cutter tooth (for 0.1 mm/tooth feed, 70 m/min cutting speed under climb milling of 12H18N10T steel)

Вид напряжений, σ	Поверхность инструмента	Материал режущей части фрезы	№	Расстояние от вершины режущей кромки, мм								
				0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
				4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	3										
σ_y	передняя	ВК8 (составная и монокристаллическая фрезы)	1	3300	3300	3300	3300	2600	1000	480	—	—
		Составная фреза ВК8 + TiN (5 мкм)*	2	3240	3240	3240	3240	2000	900	400	—	—
		Составная фреза ВК8 + ВК8 + (TiAl)N (5 мкм) и т.д. — вокруг «+»...	3	3210	3210	3210	3000	1800	830	320	—	—
		ВК8 + Ti (0,1мкм) + TiN (2мкм) + (TiAlCr)N (5 мкм)	4	2860	2860	2860	2750	1740	800	—	—	—
	задняя	ВК8 (составная и монокристаллическая фрезы)	5	3300	3300	3300	3300	3300	3000	2100	—	—
		Составная фреза ВК8 +TiN (5 мкм)*	6	3240	3240	3240	3240	3240	3000	2100	—	—
		Составная фреза ВК8 + ВК8 + (TiAl) N (5 мкм)	7	3210	3210	3120	3000	2840	2800	—	—	—
		ВК8 + Ti (0,1 мкм) + TiN (2 мкм) + (TiAlCr)N (5 мкм)	8	2860	2860	2800	2750	2680	—	—	—	—
σ_z	передняя	ВК8 (составная и монокристаллическая фрезы)	9	980	870	800	780	700	930	970	700	—
		Составная фреза ВК8 +TiN (5 мкм)*	10	970	830	790	770	750	800	900	900	800
		Составная фреза ВК8 +(TiAl)N (5 мкм)	11	970	830	710	700	670	650	610	—	—
		ВК8 + Ti (0,1 мкм) + TiN (2 мкм) + (TiAlCr)N (5 мкм)	12	950	850	700	680	650	600	—	—	—
	задняя	ВК8 (составная и монокристаллическая фрезы)	13	980	920	870	820	780	250	—	—	—
		Составная фреза ВК8 +TiN (5 мкм)*	14	970	910	830	780	770	300	—	—	—
		Составная фреза ВК8 +(TiAl)N (5 мкм)	15	970	910	900	840	800	760	720	—	—
		ВК8 + Ti (0,1 мкм) + TiN (2 мкм) + (TiAlCr)N (5 мкм)	16	920	870	830	800	740	700	680	—	—

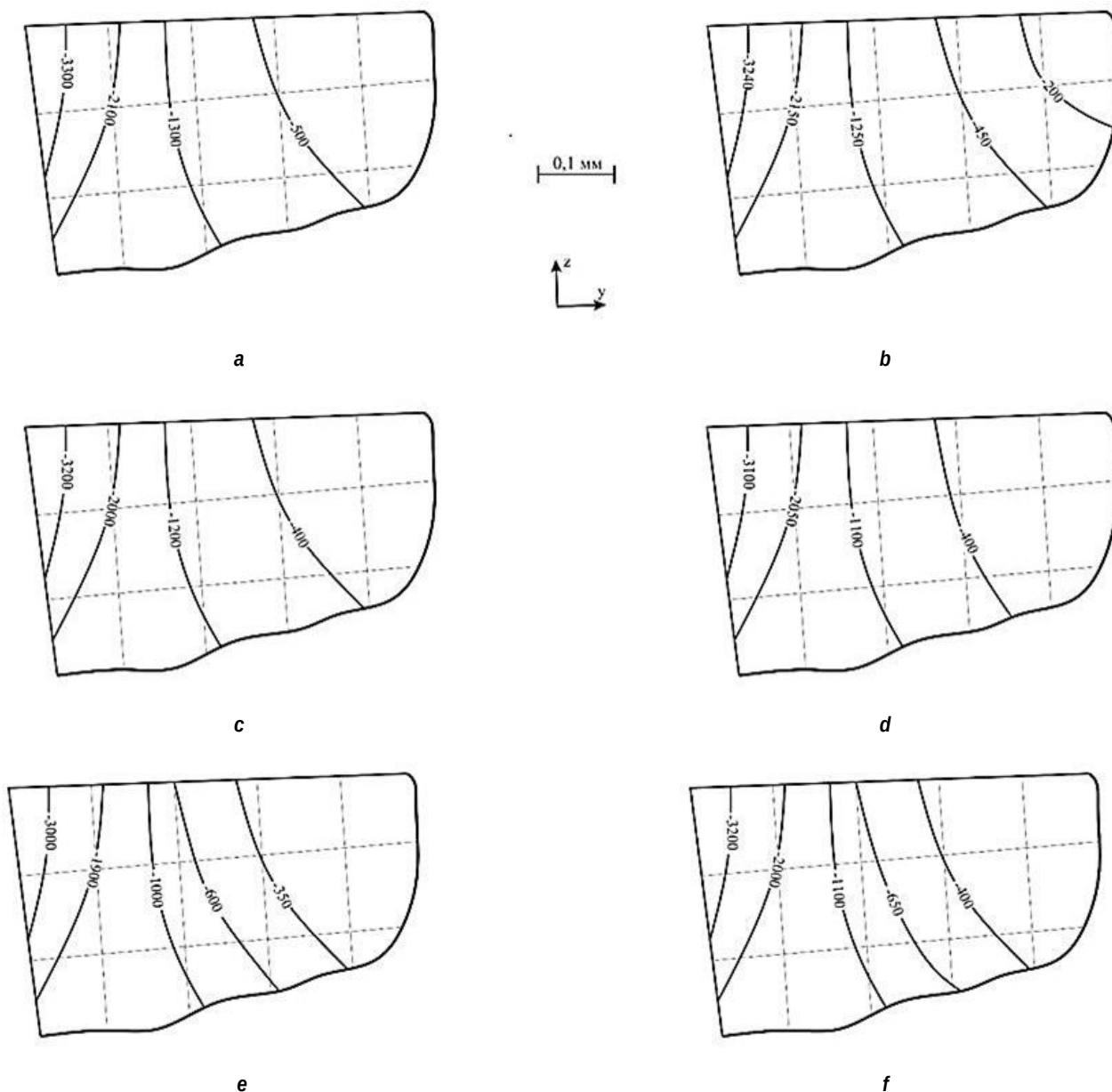


Рис. 6. Характер изменения напряжений σ_y по передней поверхности режущего клина зуба фрезы твердосплавного инструмента марки ВК8 при обработке материала 12Х18Н10Т: а – без покрытия; б – с однослойным покрытием TiN толщиной 5 мкм; с – с покрытием (TiAl)N толщиной 5 мкм; д – с трехслойным покрытием Ti + TiN + (TiAl)N общей толщиной 7 мкм; е – с трехслойным покрытием Ti + TiN + (TiAl)N общей толщиной 10 мкм; ф – с трехслойным покрытием Ti + TiN + (TiAl)N общей толщиной 5 мкм

Fig. 6. Variation nature of stresses σ_y on the front surface of the tooth cutting wedge of the VK8 carbide tool cutter when processing the 12H18N10T material: а – uncoated; б – with a single-layer TiN coating of 5 μm thickness; с – with (TiAl)N coating of 5 μm thickness; д – with a three-layer Ti + TiN + (TiAl)N coating with the total thickness of 7 μm ; е – with a three-layer Ti + TiN + (TiAl)N coating with the total thickness of 10 μm ; ф – with a three-layer Ti + TiN + (TiAl)N coating with the total thickness of 5 μm

Анализ данных, приведенных в табл. 2 и 3, позволяет сделать следующие выводы:

Наибольшие значения напряжений прогнозируются для монолитной фрезы без покрытия и для режущей части составной фрезы. Эти напряжения не являются критическими для разрушения фрезы. Характер

напряжений на передней поверхности волнообразный. Это согласуется с результатами экспериментальных исследований величин напряжений ряда исследователей [7–13].

Применение покрытий на составных фрезах снижает величины напряжений. Величина этого снижения от 1,1 раза (строка 3,

Таблица 3. Сравнение прогнозируемых величин напряжений, действующих на передней поверхности σ_y и на задней поверхности σ_z зуба фрезы с предельно допустимыми величинами напряжений

Table 3. Comparison of the predicted values of stresses acting on the front surface σ_y and on the back surface σ_z of the cutter tooth with the maximum permissible values of stresses

Нижний индекс	Прогнозируемые* величины напряжений в инструментальном материале, МПа				Предельно допустимые значения напряжений на элементах структуры твердого сплава ВК8, ГПа		
	ВК8	ВК8 + TiN (5 мкм)	ВК8 + ВК8 + (TiAl)N (5 мкм)	ВК8 + Ti (0,1 мкм) + TiN (2 мкм) + (TiAlCr)N (5 мкм)	карбид вольфрама	кобальт	границы контакта зерен карбида вольфрама
y	3300	3240	3210	2860	9,1	4,5	9,8
z	980	970	970	950			

*Для подачи 0,1 мм/зуб, скорости резания 70 м/мин при попутном фрезеровании стали 12Х18Н10Т.

столбец 4) до 10,0 раза (строки 7 и 8, столбец 4). Величина снижения неоднозначна для разных покрытий, согласуется с данными работ [14–20]. Длина контакта в целом уменьшается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты имитационного прогнозирования напряжений в инструментальном материале зубьев составной концевой твердосплавной фрезы с применением различных покрытий и без них. Полученные результаты подтверждают достижение поставленной цели исследования. Уста-

новлено, что в режущей части составной фрезы они на несколько порядков меньше критических величин, что предполагает отсутствие условий для отказа фрезы. Предложенные материалы хвостовиков составных фрез позволяют релаксировать напряжения без разрушения хвостовиков. Этим подтверждена идеология разработки составных фрез. Используемые модель и структурная схема проектирования фрез позволяют проектировать эффективные покрытия для фрез, что еще больше поднимает конкурентоспособность составных фрез монолитным фрезам.

Список литературы

1. Мокрицкий Б.Я., Верещагина А.С., Верещагин В.Ю. Моделирование напряжений и деформации твердосплавных концевых фрез // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Серия: Науки о природе и технике. 2016. № 1. С. 82–87.
2. Верещагин В.Ю., Мокрицкий Б.Я., Верещагина А.С. Прогнозное моделирование архитектуры покрытия на металлорежущем инструменте // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 4. С. 147–156.
3. Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Саблин П.А., Коннова Г.В., Кравченко Е.Г. Параметрические исследования составных твердосплавных концевых фрез // Металлообработка. 2015. № 6. С. 23–29.
4. Подойницын М.А., Мокрицкий Б.Я., Морозова А.В., Мокрицкая Е.Б. Совершенствование твердосплавной концевой составной фрезы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 1. С. 50–57. <https://doi.org/10.12737/24892>
5. Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Кваша В.Ю., Артёменко А.А., Кравченко Е.Г. Совершенствование твердосплавных концевых фрез // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 1. С. 49–54.
6. Totten G.E., Xie Lin, Funatani K. Modeling and Simulation for Material Selection and Mechanical Design. New York, 2004. 880 p.
7. Vereschaka A., Oganyan M., Bublikov Yu., Sitnikov N., Deev K., Pupchin V. Increase in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered composite nano-structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N coatings // Coating. 2018. Vol. 8. Iss. 11. P. 395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>
8. Vereschaka A.A., Vereshchagin V.Y., Sitnikov N.N., Oganyan G.V., Aksechenko A.Yu. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered composite nano-structured coating based on system Ti-TiN-(ZrNbTi)N deposited on carbide substrates // Journal of Nano Research. 2017. Vol. 45. P. 110–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>
9. Özel T., Altan T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2000. Vol. 40. Iss. 1. P. 133–152. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6)
10. Fox-Rabinovich G.S., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Kovalev A.I., Dosbaeva G.K. Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions // Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 200. Iss. 5–6. P. 1804–1813. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.057>



11. Erkens G., Cremer R., Hamoudi T., Bouzakis K.-D., Mirisidiset I., Hadjiyiannis S., et al. Properties and performance of high aluminum containing (Ti, Al)N based super-nitride coatings in innovative cutting applications // *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vol. 177-178. P. 727–734. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.08.013>
12. Zhang Hua, Deng Zhaohui, Fu Yahui, Lv Lishu, Yan Can. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 148. P. 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.077>
13. Huang Weijian, Li Xi, Wang Boxing, Chen Jihong, Zhou Ji. An analytical index relating cutting force to axial depth of cut for cylindrical end mills // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016. Vol. 111. P. 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.003>
14. Venu Gopala Rao G., Mahajan P., Bhatnagar N. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites – Cutting force analysis // *Composites Science and Technology*. 2007. Vol. 67. Iss. 3-4. P. 579–593. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.010>
15. Vasilchenko S., Cherny S., Khrulkov V. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902>
16. Shet Chandrakanth, Deng Xiaomin. Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process // *Journal of Materials Processing Technology*. 2000. Vol. 105. Iss. 1-2. P. 95–109. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00595-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00595-1)
17. Mokritskii B.Ya., Pustovalov D.A., Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Verhoturov A.D. Evaluation of efficiency of edge tool on the basis of new technique for analyzing parameters of scribing mark // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 719-720. P. 96–101. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96>
18. Zaychenko I.V., Bazheryanu V.V., Gordin S.A. Improving the energy efficiency of autoclave equipment by optimizing the technology of manufacturing parts from polymer composite materials // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 753. Ch. 2. P. 032069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032069>
19. Shatla M., Kerk C., Altan T. Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001. Vol. 41. Iss. 10. P. 1511–1534. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00016-5)
20. Dobryshkin A.Y., Sysoev O.E., Nyein Sitt Naing. Modeling of the opened shell forced vibrations with a small associated mass, with hinged operation by the Pade' approximation method // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 753. Ch. 2. P. 032024. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/3/032024>

References

1. Mokritskii B.Ya., Vereshchagina AS, Vereshchagin VY. Modeling stress and deformation of solid carbide end mills. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences*. 2016;1:82–87. (In Russ.)
2. Vereshchagin VY, Mokritskii B.Ya., Vereshchagina AS. Predictive modeling of architecture of coating on metal-cutting tool. *Uprochniaucchie tehnologii i pokritia*. 2018;14(4):147–156. (In Russ.)
3. Mokritskii B.Ya., Pustovalov DA, Sablin PA, Konnova GV, Kravchenko EG. Parametric studies of composite carbide end mills. *Metalloobrabotka*. 2015;6:23–29. (In Russ.)
4. Podoinitsyn MA, Mokritsky B.Ya., Morozova AV, Mokritskaya EB. Improvement of hard-alloy end compound miller. *Vestnik Brainskogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017;1:50–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/24892>
5. Mokritsky B.Ya., Pustovalov DA, Kvasha VYu, Artemenko AV, Kravchenko EG. Improvement of hard-alloy end milling cutters. *Problemi mashinostroenia i avtomatizazii = Engineering and Automation Problems*. 2016;1:49–54. (In Russ.)
6. Totten GE, Xie Lin, Funatani K. *Modeling and simulation for material selection and mechanical design*. New York; 2004, 880 p. <https://doi.org/10.1201/9780203913451>
7. Vereschaka A, Oganyan M, Bublikov Yu, Sitnikov N, Deev K, Pupchin V. Increase in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered composite nano-structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N coatings. *Coating*. 2018;8(11):395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>
8. Vereschaka AA, Vereshchagin VY, Sitnikov NN, Oganyan GV, Aksenenko AYU. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered composite nano-structured coating based on system Ti-TiN-(ZrNbTi)N deposited on carbide substrates. *Journal of Nano Research*. 2017;45:110–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>
9. Özel T, Altan T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000;40(1):133–152. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6)
10. Fox-Rabinovich GS, Yamamoto K, Veldhuis SC, Kovalev AI, Dosbaeva GK. Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions. *Surface and Coatings Technology*. 2005;200(5–6):1804–1813. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.057>
11. Erkens G, Cremer R, Hamoudi T, Bouzakis K-D, Mirisidiset I, Hadjiyiannis S, et al. Properties and performance of high aluminum containing (Ti, Al)N based super-nitride coatings in innovative cutting applications. *Surface and Coatings Technology*. 2004;177-178:727–734.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.08.013>

12. Zhang Hua, Deng Zhaohui, Fu Yahui, Lv Lishu, Yan Can. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2017;148:174–184.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.077>

13. Huang Weijian, Li Xi, Wang Boxing, Chen Jihong, Zhou Ji. An analytical index relating cutting force to axial depth of cut for cylindrical end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016;111:63–67.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.003>

14. Venu Gopala Rao G, Mahajan P, Bhatnagar N. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites – cutting force analysis. *Composites Science and Technology*. 2007;67(3-4):579–593.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.010>

15. Vasilchenko S, Cherny S, Khrulkov V. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2020.

<https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902>

16. Shet Chandrakanth, Deng Xiaomin. Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process. *Journal*

of Materials Processing Technology. 2000;105(1-2):95–109. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00595-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00595-1)

17. Mokritskii BYa, Pustovalov DA, Vereschaka AA, Vereschaka AS, Verhoturov AD. Evaluation of efficiency of edge tool on the basis of new technique for analyzing parameters of scribing mark // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 719-720. P. 96–101.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96>

18. Zaychenko IV, Bazheryanu VV, Gordin SA. Improving the energy efficiency of autoclave equipment by optimizing the technology of manufacturing parts from polymer composite materials. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;753(2):032069.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032069>

19. Shatla M, Kerk C, Altan T. Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001;41(10):1511–1534. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00016-5)

20. Dobryshkin AY, Sysoev OE, Nyein Sitt Naing. Modeling of the opened shell forced vibrations with a small associated mass, with hinged operation by the Pade' approximation method. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;753(2):032024.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032024>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мокрицкий Борис Яковлевич,

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,
Россия;
✉ e-mail: boris@knastu.ru

Верещагин Владислав Юрьевич,

доцент кафедры информационных систем
и цифрового образования,
Новосибирский государственный педагогический
университет,
630126, г. Новосибирск, ул. Виллюйская, 28, Россия;
e-mail: klirickv@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 30.03.2020; одобрена после рецензирования 19.07.2021; принята к публикации 20.08.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris Ya. Mokritskii,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Ave., Komsomolsk-na-Amure 681013, Russia;
✉ e-mail: boris@knastu.ru

Vladislav Yu. Vereshchagin,

Associate Professor of the Department of
Information Systems and Digital Education,
Novosibirsk State Pedagogical University,
28, Vilyuyskaya St., Novosibirsk 630126, Russia;
e-mail: klirickv@yandex.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 30.03.2020; approved after reviewing 19.07.2021; accepted for publication 20.08.2021.